

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação

EE640 - Eletrônica Básica II
Prof. Leandro Tiago Manera

Lista Spice (Aula)

Projeto de um Amplificador Diferencial com Carga ativa

Gustavo Lazero Deçordi
Lucas Batagini Brito
Pedro Henrique de Sena Bezerra

RA: 088967
RA: 095831
RA: 175766

1 - Identificação dos blocos componentes

A parte das fontes de corrente é formada pelos transistores M5, M6 e M7. A carga ativa pelos transistores M3 e M4 (tipo P). E o estágio de entrada é constituído pelo par diferencial (transistores M1 e M2, ambos do tipo N).

2 - Cálculo de R_1

Como o maior RA do grupo é 175766, a corrente de referência fica

$$I_{REF} = 10 \mu A + 66 \times 10^{-7} A = 16,6 \mu A$$

e o ganho de tensão total é dado por

$$A_v = 100 + 57 = 157 V/V .$$

Para realizar o cálculo de R_1 primeiro obtemos a queda de tensão V_{GS} através da equação da corrente. Assumindo os transistores na saturação, temos:

$$I_{REF} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) V_{OV}^2$$

Escolhemos trabalhar com os transistores M5 e M6 com larguras iguais a $1 \mu m$. Assim

$$W_5 = W_6 = 1 \mu m ,$$

$$V_{OV} = \sqrt{\frac{2 L I_{REF}}{k'_n W_6}} = \sqrt{\frac{2 \times 1 \mu \times 16,6 \mu}{10 \mu \times 1 \mu}} = 1,822 V \quad e$$

$$V_{GS} = V_{OV} + V_{r0} = 1,822 + 0,5 = 2,322 V .$$

Sabendo que $V_{cc} = 7,5 V$ e $V_{SS} = -7,5 V$, o valor de R_1 é dado por

$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_{GS} - V_{GS} - V_{SS}}{I_{REF}}$$

$$R_1 = \frac{7,5 - 2,322 - 2,322 - (-7,5)}{16,6 \mu} = 623855,42 \Omega \text{ ou cerca de } 623,86 k\Omega .$$

3 - Dimensionamento do primeiro estágio

Dimensionamos o transistor M7 para que a corrente em cada lado do par diferencial seja idêntica à corrente de referência. Nesse caso, tivemos que escolher $W_7=2 \mu\text{m}$ pois o espelho de corrente formado por M6 e M7 leva à

$$\frac{I_{D7}}{I_{REF}} = \frac{\frac{W_7}{L}}{\frac{W_6}{L}} \quad \text{ou apenas} \quad I_{D7} = \frac{W_7}{W_6} \times I_{REF}$$

$$I_{D7} = \frac{2 \mu\text{m}}{1 \mu\text{m}} \times 16,6 \mu\text{A} = 33,2 \mu\text{A}.$$

Logo, uma corrente $ID1 = ID2 = 16,6 \mu\text{A}$ igual à I_{ref} flui em cada transistor do par diferencial. O ganho do par diferencial é dependente da transcondutância de M2 e da resistência (associada à tensão de Early) em paralelo de M2 e M4:

$$A_v = g_{m2} (r_{02} // r_{04}),$$

$$\text{Onde } g_{m2} = \sqrt{2 k'_n \left(\frac{W_2}{L} \right) I_{D2}} \quad \text{e}$$

$$(r_{02} // r_{04}) = \frac{r_{02} \times r_{04}}{r_{02} + r_{04}}.$$

Observando que os transistores M2 e M4 possuem $\lambda = 0,01$ e também a mesma corrente de dreno $ID2$ a resistência $r_0 = 1/(ID2 \times \lambda)$ associada ao efeito Early também será igual. Dessa forma, o paralelo fica simplificado

$$(r_{02} // r_{04}) = \frac{r_{02} \times r_{02}}{r_{02} + r_{02}} = \frac{r_{02}}{2} \quad \text{ou apenas} \quad (r_{02} // r_{04}) = \frac{1}{2 (\lambda \times I_{D2})} = \frac{1}{2 (0,01 \times 16,6 \mu)} = 3,012 \text{ M}\Omega.$$

Vamos trabalhar a expressão do ganho nesse momento para encontrar a largura W_2

$$A_v = g_{m2} (r_{02} // r_{04})$$

$$A_v = \sqrt{2 k'_n \left(\frac{W_2}{L} \right) I_{D2}} \left(\frac{1}{2 \lambda I_{D2}} \right).$$

Elevando ao quadrado a fórmula acima, temos

$$A_v^2 = 2 k_n' \left(\frac{W_2}{L} \right) I_{D2} \times \left(\frac{1}{2 \lambda \times I_{D2}} \right)^2$$

$$A_v^2 = 2 k_n' \left(\frac{W_2}{L} \right) I_{D2} \times \frac{1}{4 \lambda^2 \times I_{D2}^2}$$

$$A_v^2 = k_n' \left(\frac{W_2}{L} \right) \frac{1}{2 \lambda^2 \times I_{D2}} \Rightarrow W_2 = \frac{2 \lambda^2 L A_v^2}{k_n'} \times I_{D2}$$

Como $I_{D2} = 16,6 \mu A$, encontramos

$$W_2 = \frac{2 \times 0,01^2 \times 1 \mu \times 157^2}{10 \mu} \times 16,6 \mu = 8,1835 \mu m.$$

Portanto, temos as seguintes dimensões para o primeiro estágio (par diferencial + carga ativa):

$$W_1 = W_3 = W_4 = W_2 = 8,1835 \mu m.$$

Com o valor de W_2 recém encontrado, podemos calcular a transcondutância de M_2 , que será

$$g_{m2} = \sqrt{2 k_n' \left(\frac{W_2}{L} \right) I_{D2}} = \sqrt{2 \times 10 \mu \times \left(\frac{8,1835 \mu}{1 \mu} \right) \times 16,6 \mu} = 52,12 \mu A/V.$$

Para finalizar esta seção, gostaríamos de discutir brevemente algumas possíveis melhorias no projeto. Poderíamos ter escolhido larguras maiores (mais próximas dos valores encontrados na prática) nos transistores M_5 e M_6 .

Por exemplo, se empregássemos $W_5=W_6=10 \mu m$ e $W_7=20 \mu m$ ao invés de $1 \mu m$ e $2 \mu m$, respectivamente, teríamos a mesma corrente de $33,2 \mu A$ no dreno de M_7 devido ao espelho de corrente (razão de 2 para 1).

Dessa forma, a corrente no par continuaria igual à $16,6 \mu A$. A resistência seria modificada para $R_1 = 773,97 k\Omega$ e as tensões de *overdrive* e *gate-source* de M_5 e M_6 seriam agora $V_{OV} = 0,576 V$ e $V_{GS} = 1,076 V$.

Dessa maneira, os cálculos fornecem o mesmo valor $W_2 = 8,1835 \mu m$ para M_2 . Assim, temos as seguintes dimensões: $W_1=W_3=W_4=W_2=8,1835 \mu m$.

Em resumo, o fato de manter a razão de áreas 2/1 no espelho formado por M_7 e M_6 manteve também W_2 e por conseguinte os parâmetros W_1 , W_3 , W_4 inalterados. Até mesmo a transcondutância g_{m2} teve seu valor fixo em $52,12 \mu A/V$.

4 - Simulação

A partir dos dimensionamentos de W, L dos transistores e R do resistor, podemos realizar a simulação do circuito da Figura 1 abaixo.

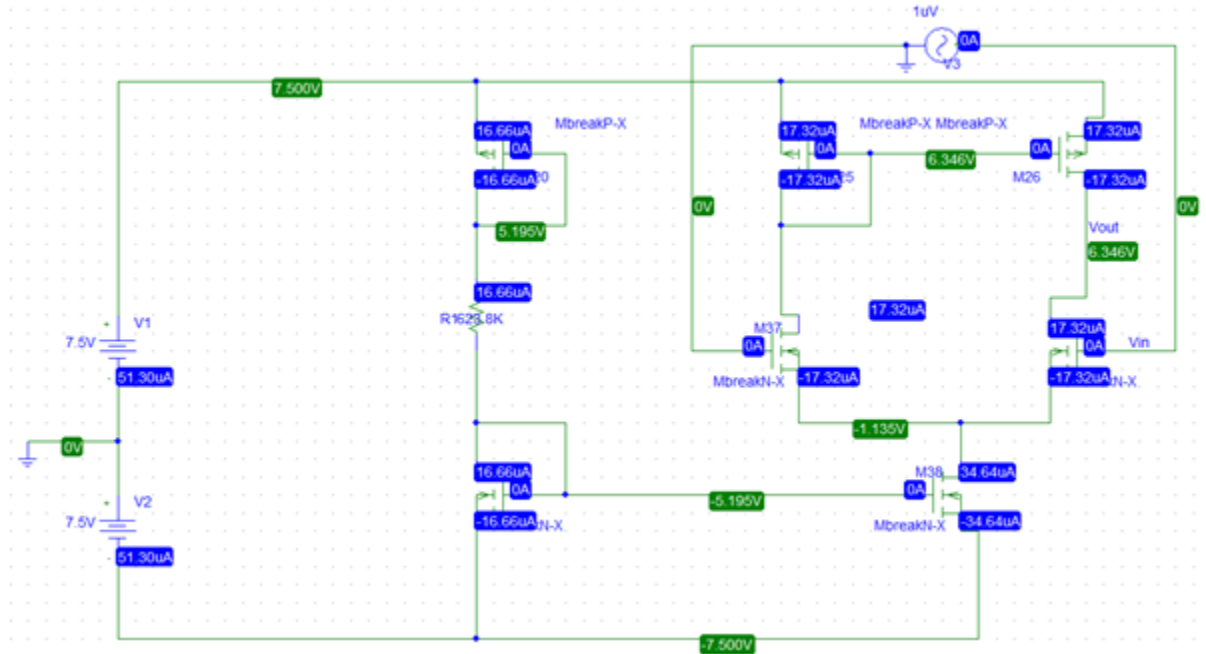


Figura 1 - Amplificador diferencial com carga ativa e espelho de corrente

No circuito acima, obtivemos uma corrente de $ID1 = ID2 = 17.32 \mu A$, muito próxima do valor esperado de $16,6 \mu A$, sendo essa diferença causada pela aproximação dos valores teóricos entre W, L e R que são aproximados por duas casas decimais no simulador.

Além disso podemos observar também que as tensões também são coerentes com os valores aqui obtidos, sendo o valor teórico de $V_{GS} = 1,822 + 0,5 = 2,322 V$ e o simulado de $V_{GS} = 7,5 - 5,1950,5 = 2,305 V$.

Agora, que pudemos observar que o circuito apresenta todos os valores de tensão e corrente conforme o esperado, vamos analisar o ganho obtido em dB (conforme pontos marcados no circuito por Vout e Vin) e também sua fase, ambos em resposta a frequência no intervalo (*range*) de 0.1 Hz a 1 GHz, conforme a Figura 2 abaixo.

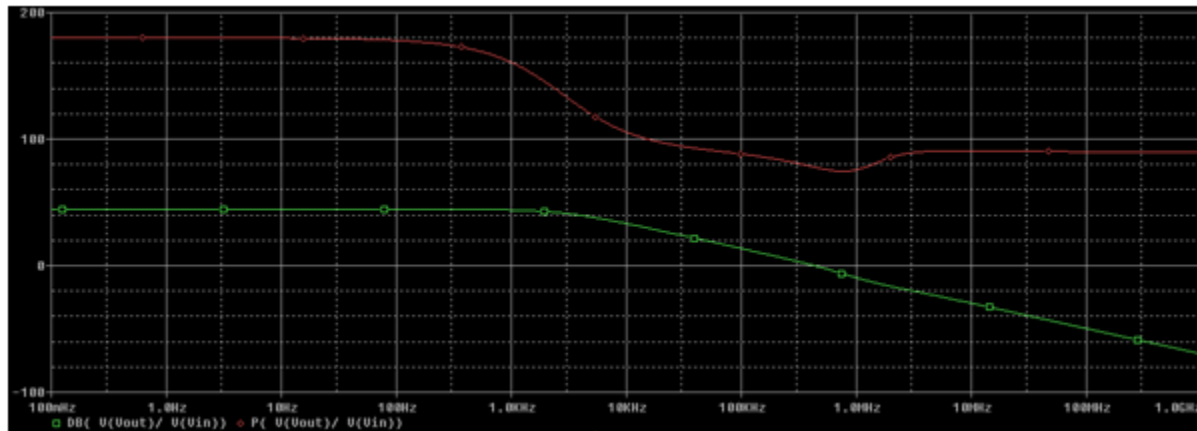


Figura 2 – Resposta em frequência do ganho (em verde) em dB (V_{out} / V_{in}) e de fase (em vermelho)

A partir da resposta em frequência do ganho, podemos notar que o ganho obtido é de aproximadamente 42 dB, o que implica em um ganho de $42 \text{ dB} = 20 \log(A_v)$, $A_v = 126 \text{ V/V}$, sendo muito próximo do ganho projetado $A_v = 157 \text{ V/V}$. Além disso, podemos observar que tal ganho é obtido até no máximo na frequência de 10 kHz, isto é a frequência de corte, onde podemos ver que a fase é próxima de $90^\circ + (180^\circ - 90^\circ) / 2 = 135^\circ$.